薄膜を用いた小型衛星用トランスミットアレーアンテナ

Thin-Film Transmitarray Antennas for Small Satellites



戸村　崇（Takashi TOMURA, Dr. Eng.）
東京科学大学　工学院　電気電子系　准教授
(Associate Professor, Institute of Science Tokyo, School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering)
電子情報通信学会　IEEE
受賞：ComEX Best Letter Award, IEICE ComEX (2026 年)，革新的無線通信技術に関する横断型研究会（MIKA 2024），ポスター賞（シニア部門)(2024)，IEEE MTT-S Japan Young Engineer Award, (2022 年)．　電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会若手奨励賞 (2018 年)　IEEE MTT-S Japan Young Engineer Award (2015 年)　他
著書：Antenna Engineering Handbook, Chapter 26 Millimeter-wave antennas, McGraw-Hill Education (2018 年)
研究専門分野：電磁波工学　アンテナ工学

あらまし

超小型衛星では、打上げ時の限られた収納空間と、通信時に必要な大きなアンテナ開口を両立することが課題である。本研究では、小型収納と大型展開を目指した薄膜トランスミットアレーアンテナを検討した。これは、多数の透過素子によって電波の位相を調整し、薄い平面構造でレンズと同様に電波を集束させるアンテナである。円弧状の銅箔パターンを形成した 2 枚のフレキシブル基板を用い、素子形状と透過特性の関係に基づいて開口面を設計した。電磁界解析では 16.0 dBi の利得が得られた。試作アンテナの測定利得は 10.3 dBi となり、解析値との差は 5.7 dB であった。この結果から、薄膜構造による指向性形成を確認するとともに、支持部材、給電条件、基板の位置ずれ、接着層を含む製作構造の影響を検証する必要性が明らかになった。今後は解析と実測の差の解明、および収納・展開後の形状と放射特性の評価を進める。

１．研究の目的

超小型衛星による通信[1]や地球観測[2]では、アンテナの高利得化＊1 が重要である。通信では、同じ送信電力でも相手に届く電波を強めることで、通信距離の拡大や通信速度の向上に寄与する。また、衛星から取得した観測データを効率よく地上へ伝送するためにも、高利得アンテナが求められる。一方、超小型衛星には搭載空間と質量の制約がある。このため、打上げ時には小さく収納し、軌道上では大きな開口面＊2 を形成するアンテナが有用である。

収納・展開型の高利得アンテナには、基板とヒンジを組み合わせたリフレクトアレー[3]、金属メッシュを用いる反射鏡[4]、柔軟な膜上に放射素子を配置するアレー[5]などがある。リフレクトアレーは各素子で反射波の位相＊3 を調整する構造であり、平面状の開口を構成できる。ただし、剛性のある基板を用いる場合には、分割数やヒンジ機構が収納寸法と質量に影響する。メッシュ反射鏡や膜状アレーでは大型化が期待できる一方、展開機構と支持構造を含めた設計が必要となる。どの方式でも、開口面の大きさ、収納性、軽量性および展開後の形状精度の両立が課題である。

本研究では、薄膜を用いたトランスミットアレーに着目した。トランスミットアレーは、反射波を利用するリフレクトアレーとは異なり、開口面を通過する電波の位相を調整する。平面レンズアンテナの一例として、2 層構造を用いた方式も報告されている[6]。本研究の狙いは、薄膜構造により収納性と軽量性を高め、大きな開口面を形成することで高利得化を図ることである。ただし、薄膜では変形が生じやすく、開口面を大きくするだけで利得が必ず向上するわけではない。変形に伴う位相誤差と開口面積の効果を併せて評価する必要がある。本稿では、その基礎検討として、薄膜透過素子の設計とアンテナ全体の解析、試作評価について述べる。

２．トランスミットアレーアンテナの原理

トランスミットアレーアンテナはレンズアンテナを平面化したものである。レンズアンテナの動作原理を**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す。レンズは入射された平面波を焦点に集める機能を持っている。

これと同じ動作を平面構造で実現するのがリフレクトアレーアンテナである。同図(b)に示すように、平面上の各アンテナ素子(以後、透過素子と呼称する)に異なる構造を用いる。この際にレンズの厚みに相当する遅延(透過位相)が生じるような素子を配置する。これにより、平面構造ではあるが、レンズと同様な働きを実現できる。

レンズの動作は光線の動きをスネルの法則に基づく屈折により理解できる。一方でトランスミットアレーアンテナでは各透過素子で入射光の進行方向を変えている訳ではない。透過素子に入射した電波が透過素子の構造で決まる遅延量の分だけ遅くなった波が出力される。この出力された波が新たな波源となり、開口全体の波源の干渉により、焦点へ集光されることになる。

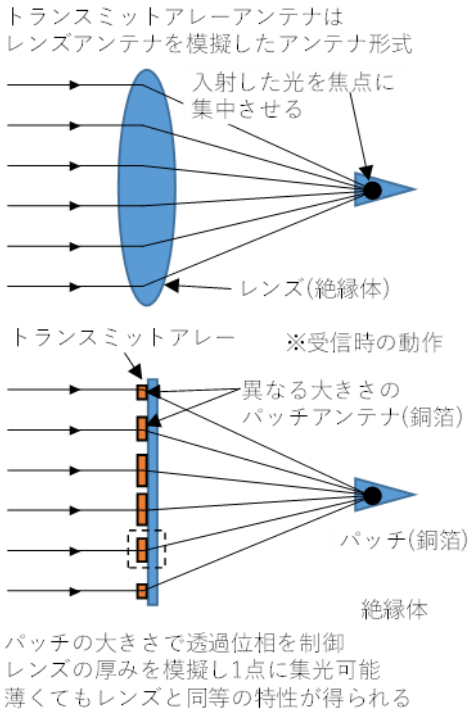


図 1 トランスミットアレーアンテナの動作原理

3．トランスミットアレーアンテナの設計方法

トランスミットアレーアンテナの設計方法について述べる。(1)まず、アンテナ全体として実現したい性能を決定する。(2)次に、この性能に基づきトランスミットアレーの寸法やトランスミットアレーと一次放射器＊4 の距離を決定する。(3)次に、トランスミットアレーの透過素子を設計する。(4)次に、一次放射器を設計する。(5)最後に設計した透過素子及び一次放射器の特性を考慮し、トランスミットアレー上に配置する透過素子の形状を決定する。必要なアンテナ特性が得られていれば設計が完了し、不足がある場合は(1)から設計をやり直すことになる。

(1) 所望性能の決定

アンテナ利得やビーム幅＊5、サイドローブレベル＊6 など、実現したいアンテナの性能を決定する。無線通信のアプリケーションであれば、回線設計に基づき、所望の通信距離や変調方式、使用する無線機の送信電力や雑音指数から、必要なアンテナ利得が決定される。なお、アンテナ利得とビーム幅は反比例の関係であり、アンテナ利得の向上とビーム幅の拡大は同時に実現できない点に注意すること。

(2) 鏡面諸元の決定

高利得アンテナの利得はアンテナ開口径によって最大値が決まる。従って実現したいアンテナ利得に応じて、アンテナ開口径、今回の場合は、トランスミットアレーの開口径を決定する必要がある。各種損失によりアンテナ利得は低下するため、一定のアンテナ効率＊7 を仮定し、アンテナ開口径を決定する。

(3) 透過素子設計

透過素子に求められる性能としては以下が挙げられる。(1) 形状の変化により 360 度の透過位相(遅延量)を実現できること。(2) 入射された波を全て出力側に放射できること。素子形状と透過及び反射特性は電磁界シミュレーションにより解析可能である。有限要素法やモーメント法などの汎用シミュレータが用いられる。

素子間の相互結合を考慮するために、周期境界条件＊8 を用いた無限素子アレー解析が用いられる。これにより素子間の相互結合を考慮することが可能である。一方で実際に設計されるトランスミットアレーでは、隣り合う素子は所望透過位相の違いにより、寸法が異なる。これは無限素子アレーの条件と異なるが、多くの場合、隣り合う素子の形状の差は小さく、無限素子アレー解析は良い近似であるため、一般的に用いられる。

(4) 一次放射器の設計

一次放射器はトランスミットアレーを効率良く照射

することが求められる。最大の利得を得るには、トランスミットアレー上の振幅は一様になるように、また、トランスミットアレーの外側への不要放射(スピルオーバー)は 0 になることである。一般にこのような放射パターンの実現には、波長に対して大きな一次放射器が必要になり現実的ではない。よって、照射分布の一様度とスピルオーバーの両方の効率を考慮して、一次放射器の放射パターンを設計する必要がある。

(5) トランスミットアレーアンテナの設計

設計した透過素子及び一次放射器の特性を考慮し、トランスミットアレー上に配置する透過素子の形状を決定する。まず、各素子に必要になる所望の透過位相を決定する。透過位相は焦点から一次放射器までの物理的な距離と一次放射器の放射位相、所望のビーム方向により決定する。次に(3)で得られた素子形状と透過位相の関係から各位置に配置する透過素子の形状を決定する。得られたトランスミットアレーアンテナを全構造解析し、所望の特性が得られているか確認する。

4．薄膜を用いたトランスミットアレーアンテナの設計

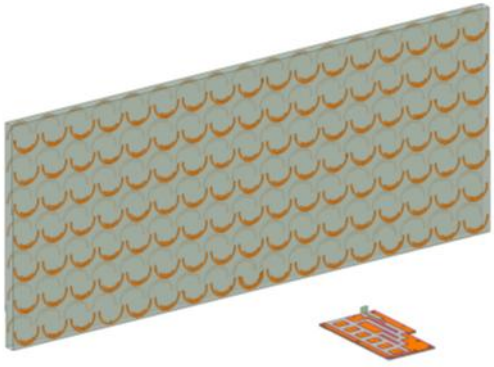
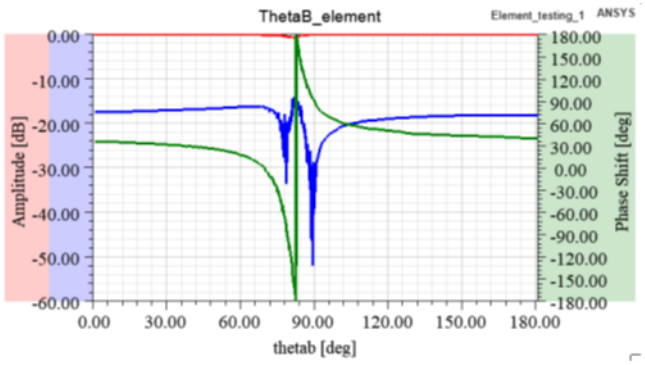
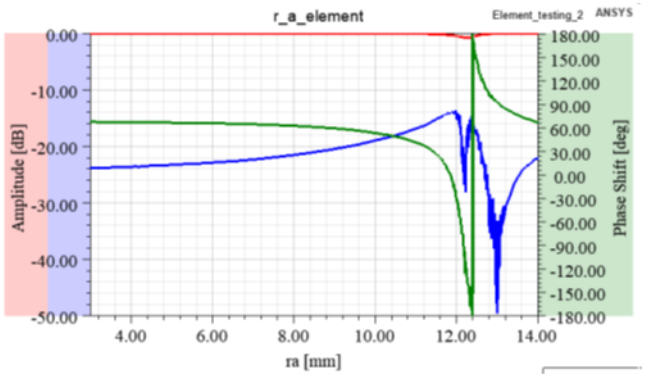


図 2 薄膜で構成するトランスミットアレーアンテナの構成

エラー! 参照元が見つかりません。に薄膜で構成するトランスミットアレーアンテナを示す。本アンテナは OrigamiSat-2 のリフレクトアレーアンテナの鏡面諸元及び一次放射器を使用している。これは小型衛星の搭載性を考慮したためである。リフレクトアレーは 2 枚のフレキシブル基板で構成する。フレキシブル基板には円弧状の銅箔パターン[6]が形成されている。



(a) 素子回転角に対する変化



(b) 素子半径に対する変化

図 3 透過素子単体の透過振幅(赤線)・透過位相(緑線), 反射振幅(青線)

透過素子単体の解析結果を**エラー! 参照元が見つかりません。**示す。透過素子には素子の回転角と円弧の半径の主に 2 つのパラメータがある。これらを変化させると、透過位相は 360 度の範囲で変化していることが分かる。また、透過振幅は-1dB 以上であり、高く保たれていることが分かる。反射は-10dB 以下であり、良好に抑圧されている。

これらの透過素子を用いてトランスミットアレーアンテナを設計した。透過素子は円弧の半径を固定とし、円弧の回転角のみを変化させ、所望の透過位相を実現させた。トランスミットアレーアンテナの放射パターンの解析結果を**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す。所望の方向に 16.0 dBi の利得が得られた。また不要な方向への放射は低く抑えられていることが分かる。

薄膜を用いた小型衛星用トランスミットアレーアンテナ

Thin-Film Transmitarray Antennas for Small Satellites

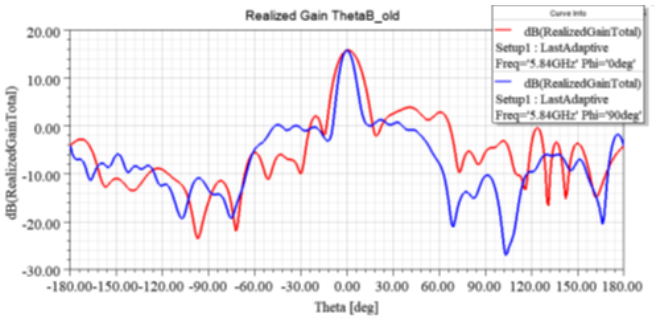


図 4 トランスミットアレーアンテナの放射パターン

本リフレクトアレーを試作評価した。厚さ 25 μm のポリイミド基板に、厚さ 18 μm の銅ストリップをプリント基板製造工程で形成した。これらの基板を、比誘電率 1.13、厚さ 10 mm の発泡スチロール層の両面に配置した。試作したトランスミットアレーアンテナを**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す。

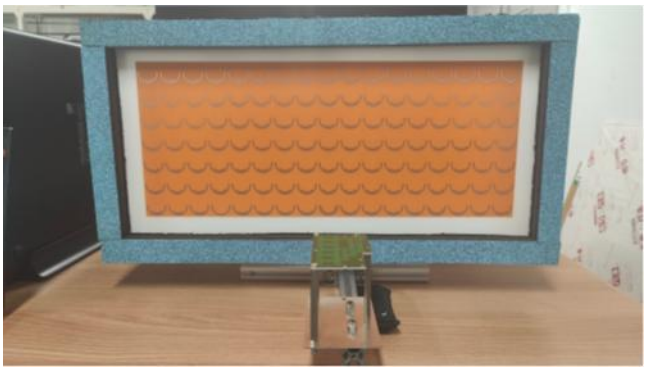


図 5 試作トランスミットアレーアンテナ

本アンテナを電波暗室内で測定した。設計周波数における利得は 10.3dBi であり、解析値の 16.0dBi と比較し 5.7dB の差があった。この差の原因として、モデル周囲のアルミニウムフレーム、一次放射器の不完全さ、製作方法、二枚の基板のわずかな位置ずれなどが考えられる。

また、製作時には、まず各基板を厚さ 5 mm の発泡スチロール板に取り付け、その後、手作業で切断して二枚を貼り合わせた。解析では、接着層を挟んだ二枚の 5 mm 厚板ではなく、単一の 10 mm 厚板を仮定したため、特に発泡スチロール層の比誘電率を適切に表現できていない可能性がある。

5．まとめ

本研究では、小型衛星用の収納・展開型高利得アンテナを目指し、2 枚のフレキシブル基板を用いた薄膜トランスミットアレーを設計・試作した。円弧状の透過素子によって開口面の位相分布を形成し、解析では 16.0 dBi、実測では 10.3 dBi の利得を得た。薄膜構造を用いた指向性形成を確認した一方、解析値と実測値には 5.7 dB の差があり、製作構造を反映したモデル化と精度管理の重要性が示された。

当面は、支持部材、接着層、位置ずれおよび一次放射器の影響を検証し、解析と測定の整合性を高める。その後、収納・展開方法を具体化し、展開後の変形、繰返し動作に伴う変化、質量と収納体積を放射特性と併せて評価する。将来的には超小型衛星の通信アンテナや、可搬型の地上通信アンテナへの応用が期待される。衛星搭載に向けては、さらに振動や熱真空などの環境を考慮した検証が必要であり、現段階で実用化時期を確定することはできない。これらの段階的な検討を通じて、薄膜構造の収納性と電気性能を両立する設計指針の確立を目指す。

用語解説

*1 アンテナ利得：特定の方向へどれだけ効率よく電波を送受信できるかを表す指標。dBi は、すべての方向へ一様に放射する理想アンテナを基準とした値である。

*2 開口面：電波の送受信に利用するアンテナの面。本稿では透過素子を配列した面を指す。

*3 位相：周期的に振動する波が、振動のどの段階にあるかを表す量。複数の波は、位相がそろうと強め合う。

*4 一次放射器：トランスミットアレーを照射する小型のアンテナ。受信時には、集束された電波を受ける。

*5 ビーム幅：主な放射方向の周囲に電波が広がる角度。代表的には、放射強度が最大値の半分となる 2 方向の角度差で表す。

*6 サイドローブ：主なビーム以外の方向に現れる放射の山。目的外の方向への放射や干渉の原因となる。
*7 アンテナ効率：開口面積から求まる理想的な利得に対して、実際の開口がどの程度有効に利用されているかを表す指標。材料損失や反射損失など全ての損失を含む。
*8 周期境界条件：同じ構造が周期的に繰り返すと仮定し、その一部分だけで全体の電磁界を解析するための境界条件。

参考文献

[1] J. Alvarez and B. Walls, “Constellations, clusters, and communication technology: Expanding small satellite access to space,” in Proc. IEEE Aerosp. Conf., Big Sky, MT, USA, Mar. 2016, pp. 1–11.
[2] T. Obata, H. Saito, K. Tanaka, S. Nakasuka, and S. Shirasaka, “The development status of the first demonstration satellite of our commercial small synthetic aperture radar satellite constellation,” in Proc. 33rd Annu. AIAA/USU Conf. Small Satell., Logan, UT, USA, 2019, pp. 1–5. [Online]. Available: https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2019/all2019/91/
[3] R. E. Hodge, N. Chahat, D. J. Hoppe, and J. D. Vacchione, “A deployable high-gain antenna bound for Mars,” IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 59, no. 2, pp. 39–49, Feb. 2017.MarCo ・・・・・・・・・・・・・・・・
[4] Y. Rahmat-Samii, V. Manohar, J. M. Kovitz, R. E. Hodges, G. Freebury, and E. Peral, “Development of highly constrained 1 m Ka-band mesh deployable offset reflector antenna for next generation CubeSat radars,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 67, no. 10, pp. 6254–6266, Oct. 2019.
[5] K. Suzuki, H. Kurokawa, G. Nakayama, M. Yasuhara, A. Ochi, S. S. Yeon, H. Sakamoto, and T. Tomura, “A 5.8-GHz-band origami deployable reflectarray antenna for CubeSats,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 74, no. 4, pp. 3142--3153, Apr. 2026.
[6] C. Xue, Q. Lou and Z. N. Chen, “Broadband Double-Layered Huygens’ Metasurface Lens Antenna for 5G Millimeter-Wave Systems,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1468-1476, March 2020.

この研究は、令和４年度ＳＣＡＴ研究助成の対象として採用され、令和５～７年度に実施されたものです。